

# Прямые атмосферные нейтрино в модели кварк-глюонных струн

**М. Сороковиков, С. Синеговский**  
**Иркутский государственный**  
**университет**

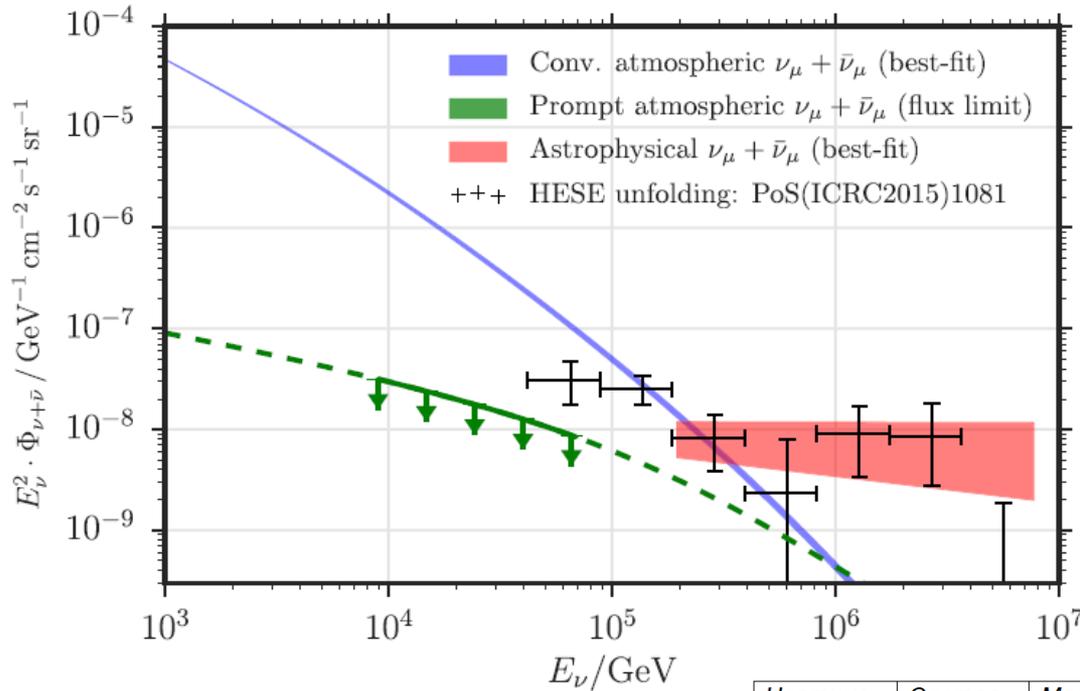
**XV Международная Байкальская Молодежная**  
**Научная Школа по Фундаментальной Физике**  
**Иркутск, 11-16 сентября 2017**

# Астрофизические нейтрино vs. Атмосферные нейтрино

- Долгожданный результат в нейтринной астрофизике – регистрация в эксперименте IceCube нескольких десятков высокоэнергетических событий от нейтрино космического происхождения [M.G. Aartsen, Science 342 (2013); M.G. Aartsen, ApJ, 833:3 (2016)]
- Это вызвало оживление интереса к проблеме фона – потоку атмосферных нейтрино
- Наибольшую неопределенность расчета фона атмосферных нейтрино при энергиях выше 500 ТэВ вносят малоизученные процессы рождения очарованных частиц

# Атмосферные нейтрино

M.G. Aartsen, ApJ, 833:3 (2016)



атмосферные нейтрино ( $E, \theta$ )

«прямые»

«обычные»

Частица	Состав	Масса, МэВ	Время жизни, с
$D^+, D^-$	$c\bar{d}, \bar{c}d$	1870	$10.4 \times 10^{-13}$
$D^0, \bar{D}^0$	$c\bar{u}, \bar{c}u$	1865	$4.1 \times 10^{-13}$
$D_s^+, D_s^-$	$c\bar{s}, \bar{c}s$	1968	$5 \times 10^{-13}$
$\Lambda_c^+$	$udc$	2287	$2 \times 10^{-13}$
$\mu^+, \mu^-$	—	106	$2.2 \times 10^{-6}$
$\pi^+, \pi^-$	$u\bar{d}, \bar{u}d$	140	$2.6 \times 10^{-8}$
$K^+, K^-$	$u\bar{s}, \bar{u}s$	494	$1.2 \times 10^{-8}$
$\Lambda_0$	$uds$	1116	$2.6 \times 10^{-10}$

источники  
«прямых» нейтрино  
(«очарованные частицы»)

источники  
«обычных» нейтрино  
( $(\pi, K)$ -нейтрино)

# Модель кварк-глюонных струн (МКГС)

- МКГС – непертурбативная модель, описывающая мягкие адронные процессы: рождение нуклонов и мезонов
- Модель основана на теории Редже, топологическом  $1/N_f$ –разложении амплитуд и динамике цветных струн [Кайдалов А.Б., Тер-Мартirosян К.А., ЯФ 39 (1984); Кайдалов А.Б., Пискунова О.И., ЯФ 43 (1986)]; Кайдалов А.Б., УФН 173 (2003)]
- Кроме параметров, определенных из глобального фита экспериментальных данных, существуют свободные параметры:
  - ✓ интерсепт  $c\bar{c}$ -траектории Редже  $\alpha_\psi(t) \approx \alpha_\psi(0) + \alpha'_\psi t$
  - ✓ параметр  $a_1$ , обеспечивающий усиление фрагментации валентных кварков  $a_1 = 2 \div 30$

**Интерсепт  $c\bar{c}$ -траектории Редже**  $\alpha_\psi(0) = ?$


$$\alpha_\psi(0) = 0$$

**нелинейная траектория  
(соответствует pQCD)**

11.09.2017


$$\alpha_\psi(0) = -2.2$$

**линейная траектория  
(по аналогии с легкими кварками)**

# Полное сечение рождения D-мезонов в pp-соударениях

$$\alpha_\psi(0) = 0$$

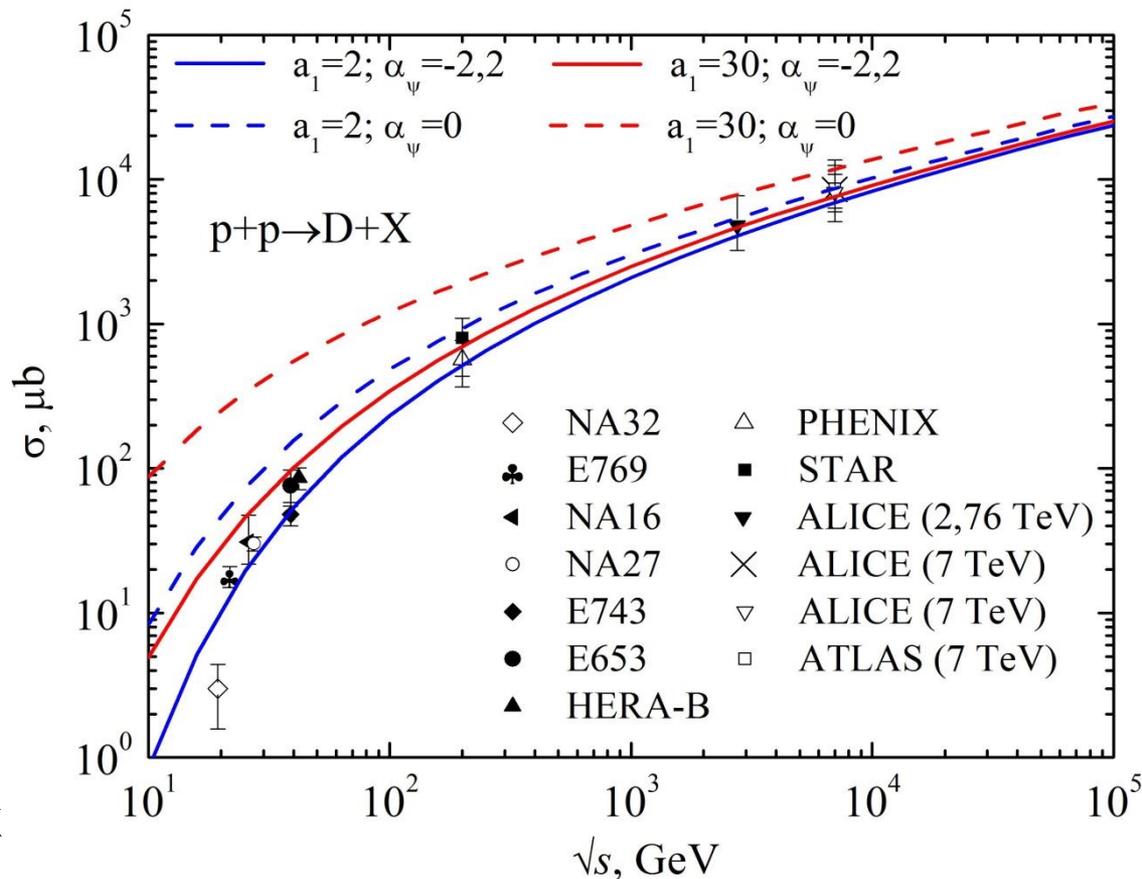


при  $\sqrt{s} < 1 \text{ ТэВ}$  расчет для  $a_1=30$  не согласуется с экспериментальными данными;

$$\alpha_\psi(0) = -2.2$$

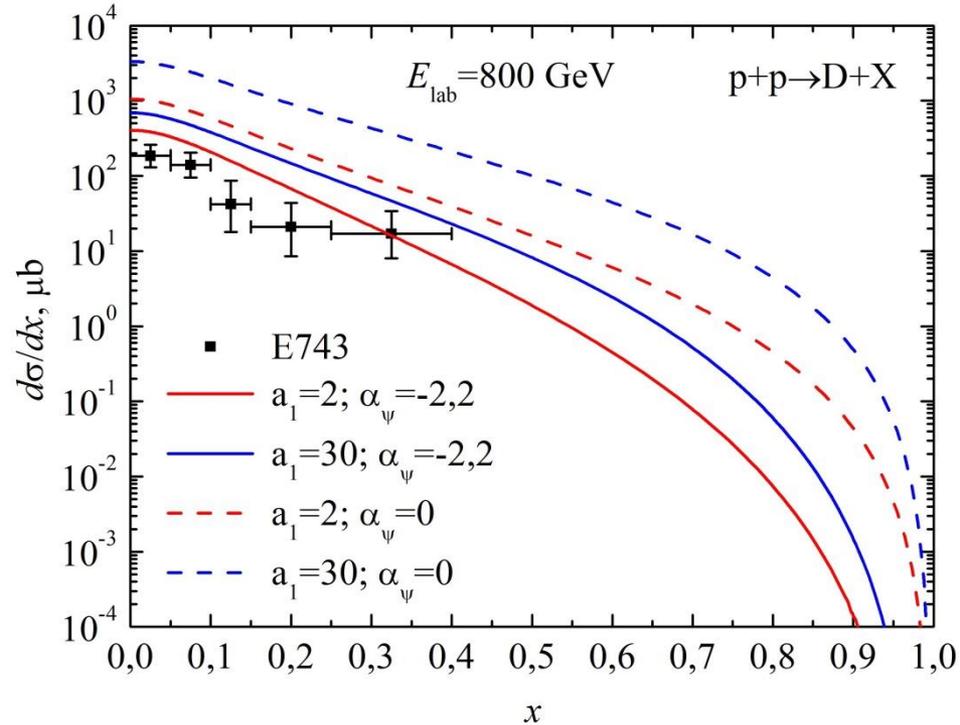
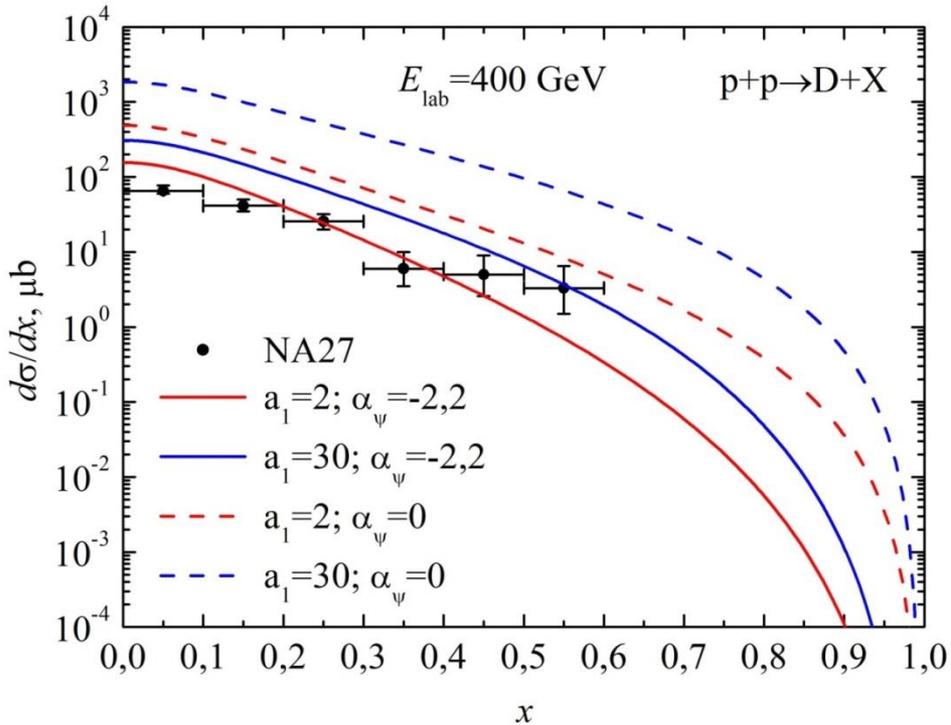


лучшее описание экспериментальных данных



При высоких энергиях влияние параметра  $a_1$  на  $\sigma_{\text{tot}}$  незначительно

# Рождение D-мезонов в pp-соударениях: влияние параметра $\alpha_\psi(0)$ на $d\sigma/dx$

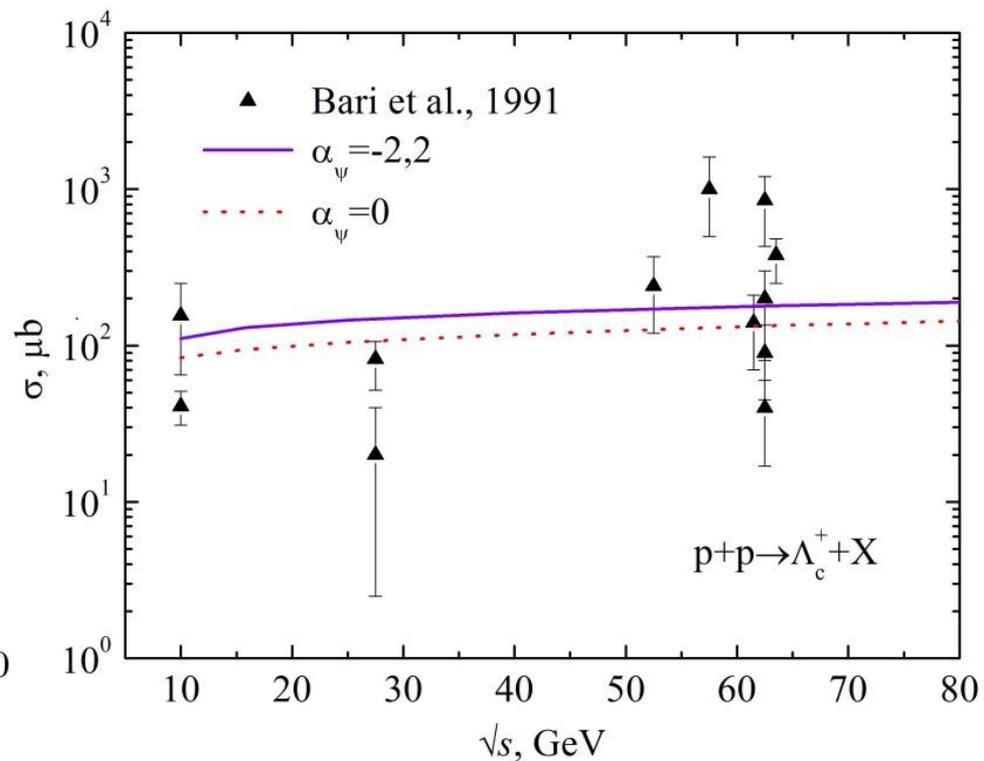
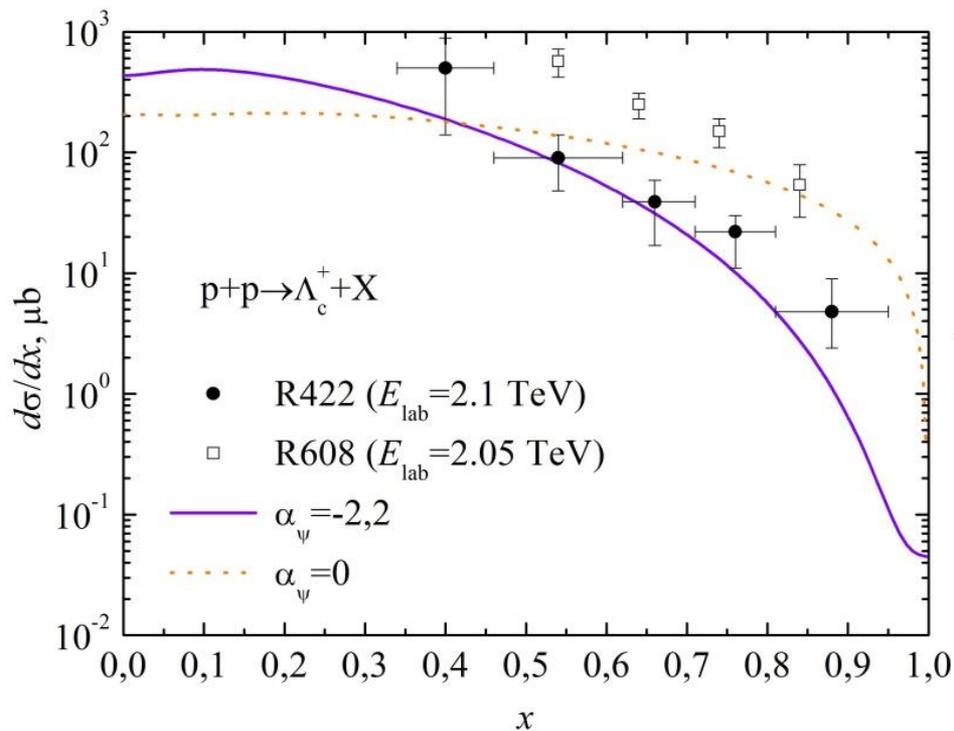


$$\alpha_\psi(0) = 0$$



**несовместимо с данными экспериментов**

# Сечения рождения $\Lambda_c$ -барионов в pp-взаимодействии



$$\alpha_\psi(0) = -2.2$$



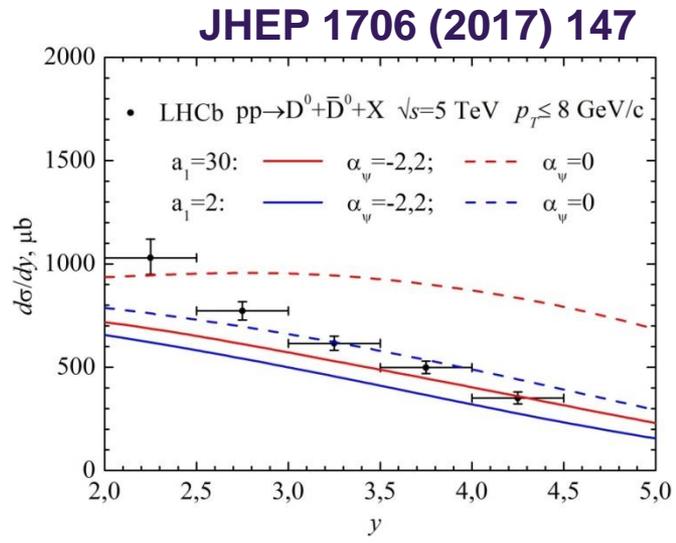
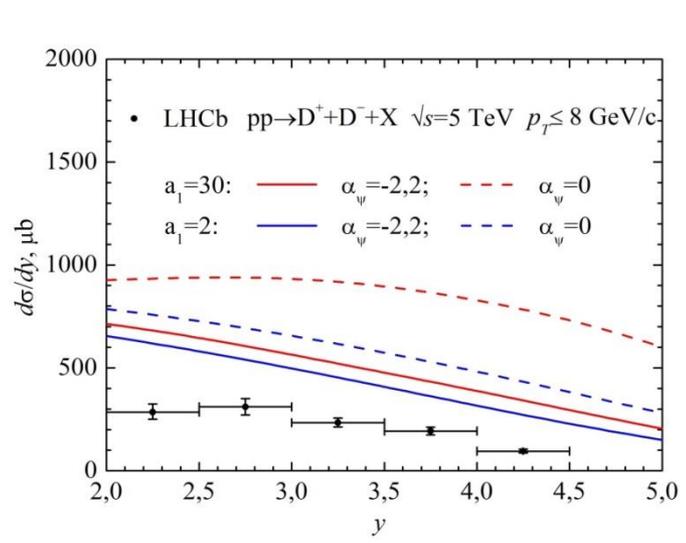
кажется предпочтительным

# Центральная область в эксперименте LHCb (D-мезоны, pp-соударения; $\sqrt{s}=5$ и 7 ТэВ)

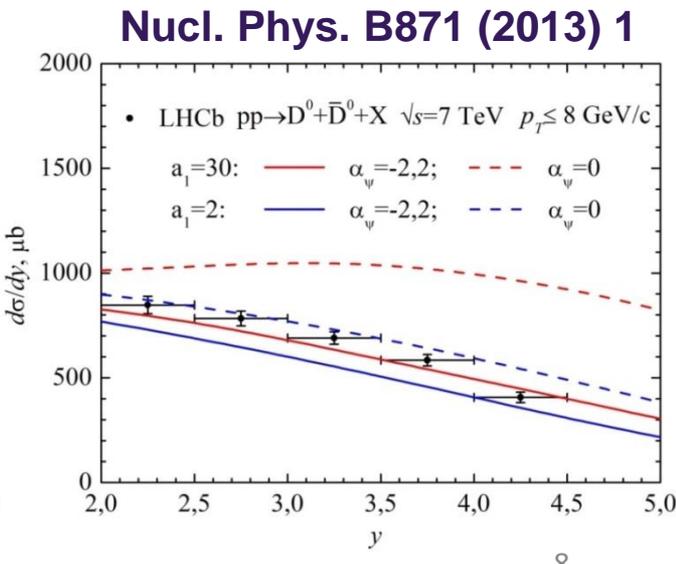
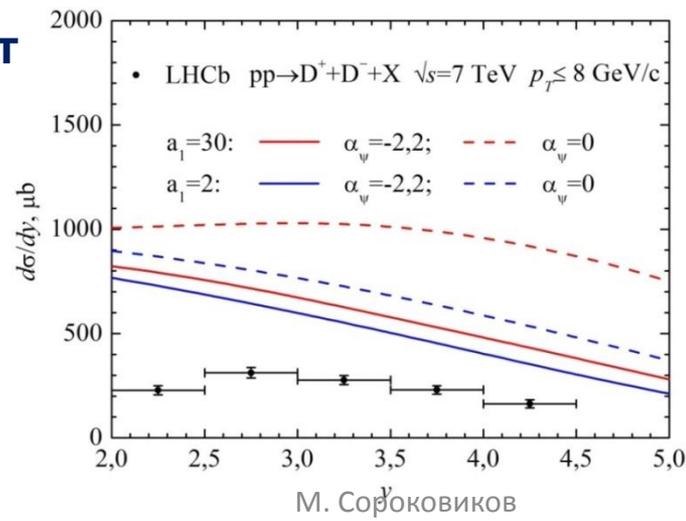
**D<sup>±</sup> vs. D<sup>0</sup> :**  
проблема малых x  
( $x \sim 10^{-3}-10^{-2}$ )



**практически не влияет  
на потоки нейтрино**



**JHEP 1706 (2017) 147**



**Nucl. Phys. B871 (2013) 1**

# Метод расчета потока прямых нейтрино

Поток прямых атмосферных нейтрино рассчитан с помощью метода z-факторов [E.V. Bugaev et al., Nuovo Cim. C 12, 41 (1989)], в котором учитывался рост с энергией полных неупругих сечений взаимодействия.

## Спектр первичных космических лучей:

- модель Никольского-Стаменова-Ушева (НСУ) – для сравнения со старым расчетом
- модель Ерлыкина-Крутиковой-Шабельского (ЕКШ) – описывает современные экспериментальные данные, большой наклон после «колена»
- простейшая параметризация Thunman-Ingelman-Gondolo (TIG) – только для сравнения с другими расчетами

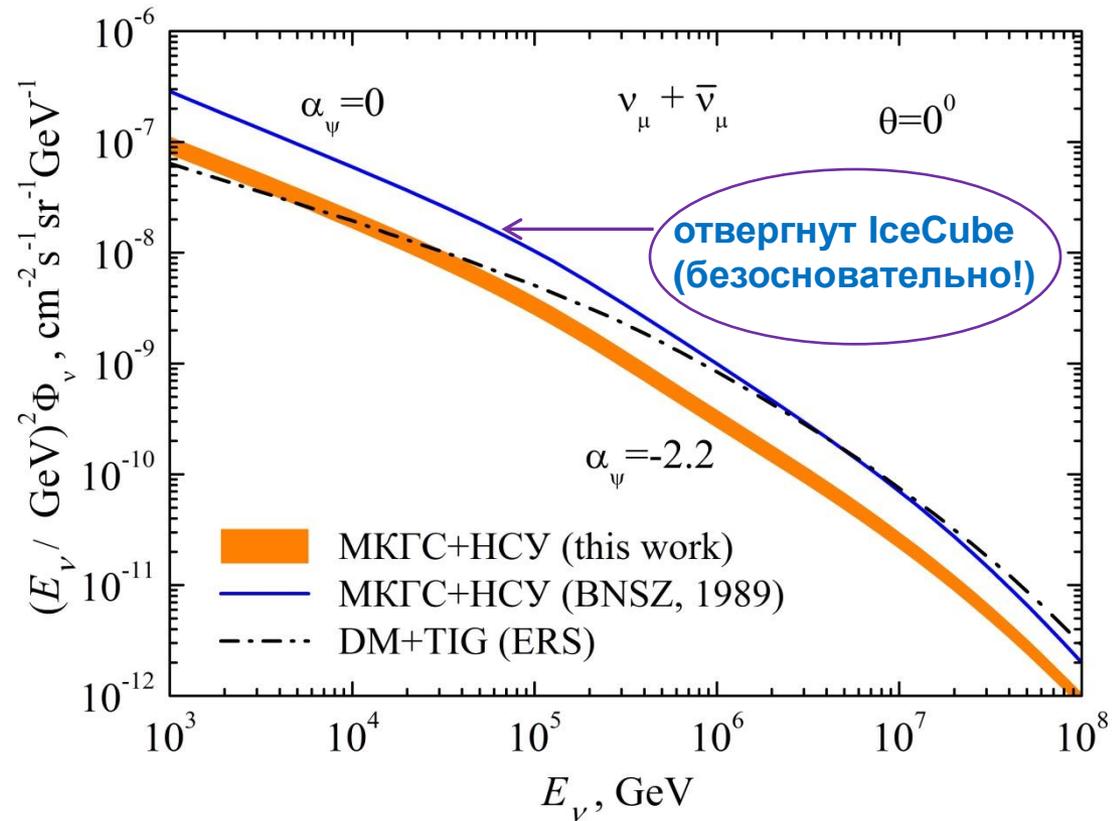
# Прямые атмосферные нейтрино: сравнение с эталонной моделью IceCube (DM)

$$\alpha_\psi(0) = 0 \quad \longrightarrow \quad \alpha_\psi(0) = -2.2 :$$

**сильное влияние  
(фактор ~ 3)**

**BNSZ: E.V. Bugaev et al.,  
Nuovo Cim. C 12, 41 (1989)**

**DM (ERS): R. Enberg, M. H. Reno,  
I. Sarcevic, Phys. Rev. D78 (2008)  
043005**



**Область неопределенности обусловлена различным значением  $a_1$  (2-30):  
граничные значения параметра  $a_1$  изменяют поток нейтрино в 1.4 раза**

# Модели потоков прямых мюонных нейтрино: коэффициенты отвержения

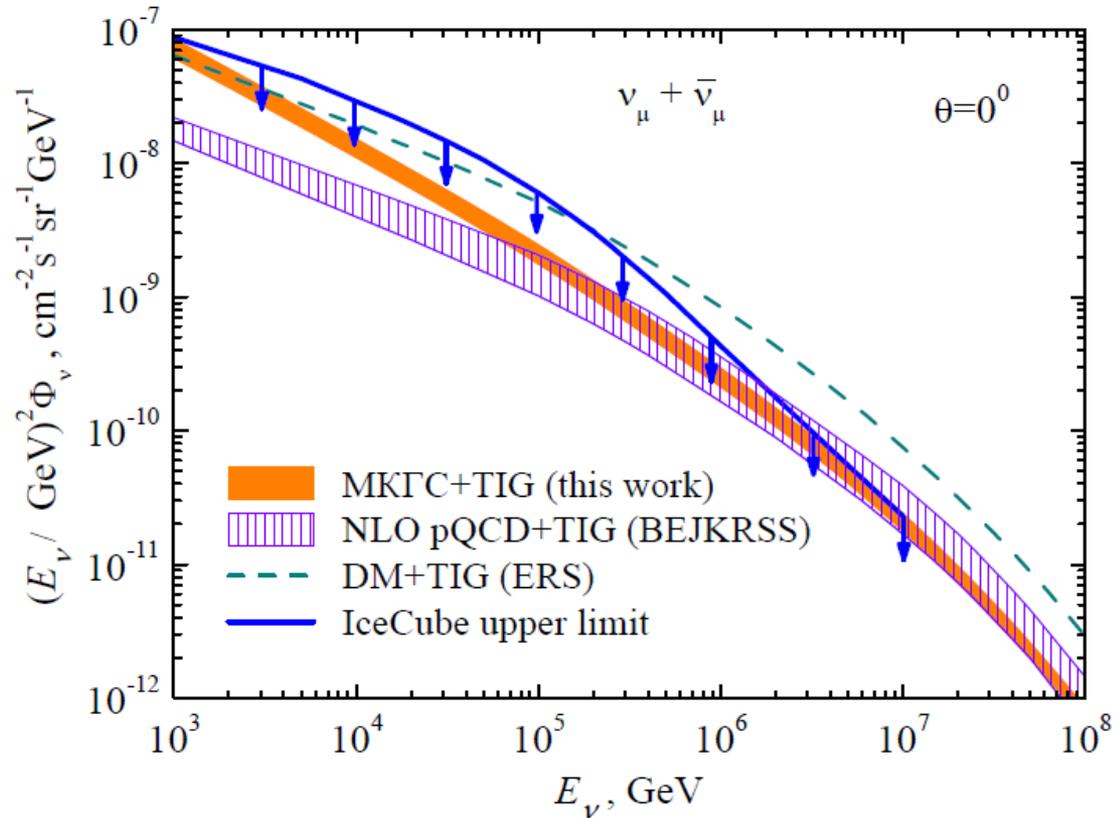
**M.G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. D 89, (2014) 062007**

TABLE VI. Model rejection factors for different theoretical predictions of prompt atmospheric neutrino fluxes [11–13]. If not noted otherwise, these models are the original published models and have not been modified for a more accurate cosmic-ray flux parametrization. Except for the baseline model ERS08 with H3a knee, MRFs are based on a  $\chi^2$  approximation.

Model	MRF
ERS08 + H3a [13,15]	3.8
ERS08 [13]	4.8
ERS08 (max) [13]	3.8
ERS08 (min) [13]	8.2
MRS03 (GBW) [11]	9.9
MRS03 (MRST) [11]	8.0
MRS03 (KMS) [11]	8.3
BNSZ89 (RQPM) [12]	0.5
BNSZ89 (QGSM) [12]	1.8

**BNSZ89:**  
Bugaev E.V.,  
Naumov V.A.,  
Sinegovsky S.I.  
Zaslavskaya E.S..  
Nuovo Cim. C12  
(1989) 41.

# Поток прямых нейтрино: сравнение различных моделей рождения «чарма»

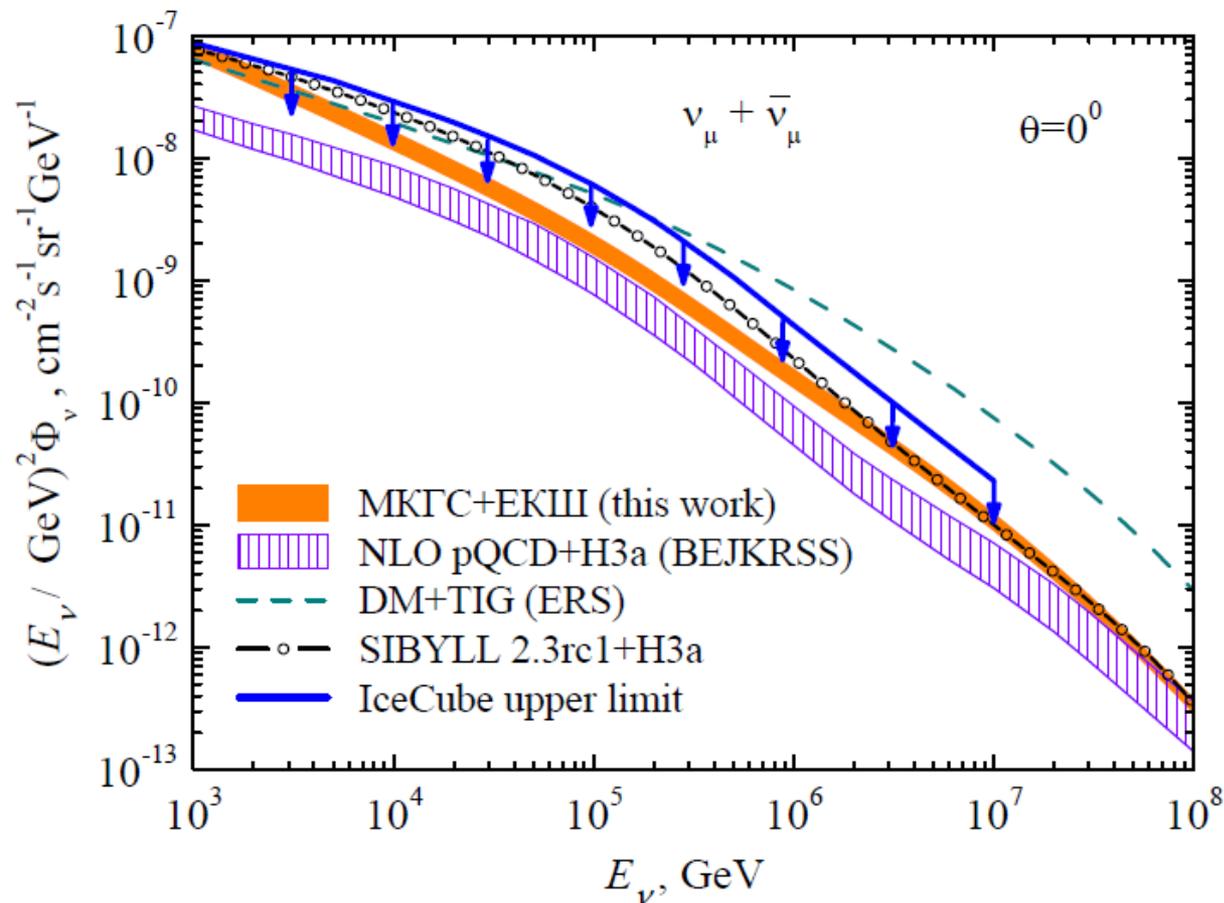


при  $E_\nu > 10^6$  ГэВ:

расчет МКГС практически совпадает с  
результатом NLO pQCD

наш расчет (МКГС) заметно  
ниже, чем предсказания  
дипольной модели (ERS)

# Потоки прямых атмосферных нейтрино: сравнение расчетов



Новое предсказание  
потока прямых  
нейтрино для МКГС  
совместимо с  
ограничением  
эксперимента  
IceCube

Расчет потока для МКГС близок к результатам для моделей NLO  
pQCD и SIBYLL 2.3rc1

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ❑ Новые значения свободных параметров МКГС уменьшили поток прямых нейтрино в 3 раза по сравнению с прежним результатом [E.V. Bugaev et al., Nuovo Cim. C 12, 41 (1989)]
- ❑ Наш расчет прямых нейтрино сопоставим с результатом NLO pQCD-модели
- ❑ Новый поток прямых нейтрино, рассчитанный в рамках МКГС:
  - оказался заметно менее интенсивным, чем поток в расчете с эталонной (дипольной) моделью IceCube
  - не противоречит экспериментальному ограничению IceCube

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**